MODEL MATEMATIS DAN SIMULASI PERPINDAHAN PANAS PROSES PENGECORAN KONTINYU BAJA SLAB

Prihadi Setyo Darmanto[1], Arief Syahlan[2], dan Koesnohadi[3]

[1]Laboratorium Teknik Pendingin, Departemen Teknik Mesin FTI-ITB
[2]Institut Semen dan Beton Indonesia
[3]PT Krakatau Steel, Cilegon

Abstrak

Makalah ini mempresentasikan model matematis dan simulasi numerik proses pengecoran kontinyu baja slab dengan bantuan paket program CFD (Computational Fluid Dynamics) FLUENT 5.4. Dalam simulasi numerik akan dievaluasi distribusi temperatur di seluruh bagian slab sejak keluar dari cetakan (mould) hingga daerah pelurusan material (straightening). Hasil simulasi divalidasi dengan data pengukuran di lapangan untuk titik-titik tertentu. Hasil validasi menunjukkan kecocokan antara kedua besaran tersebut. Selain itu distribusi fasa cair dan fasa padat juga dievaluasi sehingga dapat dipergunakan sebagai cara untuk menentukan daerah dimana seluruh bahan mulai berfasa padat seluruhnya.

Abstract

This paper presents mathematical model and numerical simulation using CFD software FLUENT 5.4 applied on continuous casting process of steel slab. The distribution of temperature of the steel slab since it exits the mould till straightening region was evaluated. The result of numerical evaluation was also compared to the measurement temperature taken at some selected points. The comparison showed that there was a good agreement between the numerical result and the measurement data. The percentage of both liquid and solid phases along the slab was also simulated. It seems that the simulation of solid phase growth could be used as a method for determining the cross section position where the solidification ceases.

Keywords: *continuous casting, steel slab, solid and liquid phases, temperature distribution.*

1. PENDAHULUAN

Berdasarkan statistik data produksi suatu pabrik *slab* baja di Indonesia maupun pabrik sejenis di seluruh dunia, sekitar 85 % dari baja karbon *medium* yang diproduksi mengalami cacat *corner crack*. Cacat seperti ini memang umum terjadi di pabrik slab dan biasanya ditanggulangi dengan proses *scarfing*. Kelemahan penanganan proses ini antara lain: menurunkan *yield*, memperpanjang waktu *conditioning*, dan dapat menimbulkan resiko akan timbulnya cacat-cacat baru yang secara keseluruhan akan mengakibatkan kenaikan biaya produksi. Berkaitan dengan hal itu, alternatif penanganan atau metode pencegahan cacat *corner crack* yang lebih baik merupakan suatu kebutuhan.

Dari beberapa kajian, teridentifikasi penyebab cacat *corner crack* adalah karena adanya fenomena penggetasan antar butir yang diinisiasi oleh tegangan yang bekerja bersamaan dengan terjadinya proses transformasi gamma-alpha (temperatur A_3) pada proses pendinginan *hot strand*. Fenomena ini dipengaruhi oleh intensitas tegangan yang ditimbulkan oleh proses *straightening* dan distribusi temperatur *hot strand*. Kedua faktor tersebut berkaitan dengan disain *caster*, terutama bentuk *mould*, radius dan sistem *rebending caster*. Perubahan disain bentuk *mould* misalnya diharapkan mampu mengurangi terjadinya cacat *corner crack*. Perbaikan kinerja diharapkan diperoleh dari adanya perbaikan distribusi temperatur slab selama proses solidifikasi. Berkaitan dengan hal tersebut maka diperlukan pengkajian distribusi temperatur *slab* untuk *mould* berbentuk rektangular sejak baja keluar dari cetakan hingga daerah pelurusan (*straightening*). Hal inilah yang mendorong dilakukannya penelitian ini sebelum dilakukan penelitian lanjutan mengenai desain cetakan yang oktangular.

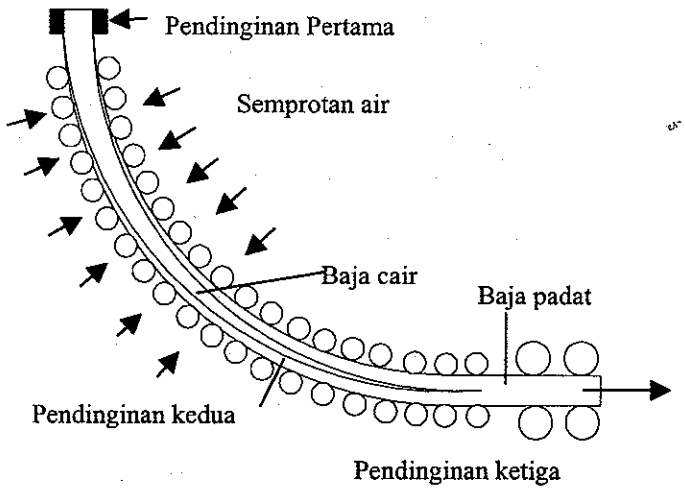
2. MODEL MATEMATIK PEMBEKUAN PADA PROSES PENGECORAN KONTINYU

Proses perubahan fasa dari baja cair menjadi baja padat yang terjadi selama proses pengecoran kontinyu berlangsung dengan melepaskan komponen panas sensibel dan laten melalui modus radiasi, konduksi dan konveksi. Berdasarkan tempat berlangsungnya pelepasan panas selama proses pengecoran, pelepasan panas dapat dibagi menjadi tiga bagian (lihat Gambar (1)), yaitu pendinginan pertama yang berlangsung di dalam *mould*, pendinginan kedua yang merupakan pendinginan saat keluar *strand* dari dasar *mould* dengan cara menyemprotkan air dan pendinginan oleh rol-rol penyangga *strand* serta pendinginan radiasi. Pendinginan ketiga adalah pendinginan melalui radiasi saja dari slab ke lingkungan sekitarnya.

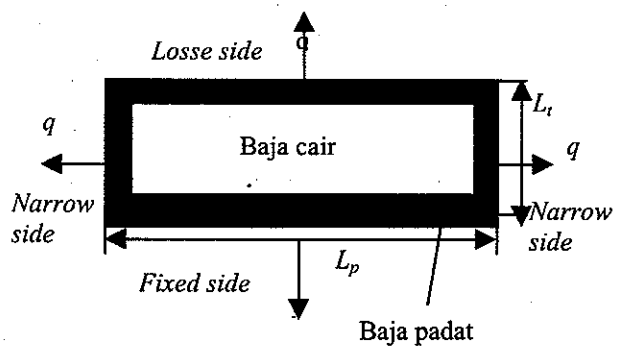
Model matematik proses pembekuan dan pendinginan selama proses *continuous casting* (Gambar (1)) dapat dipandang dengan dua cara yaitu:

a. Proses *unsteady* dua dimensi, yaitu suatu irisan slab dipandang dalam keadaan berjalan dengan kecepatan sama dengan kecepatan *casting* sambil membeku dan melepaskan panas ke lingkungan.
b. Proses *steady* tiga dimensi dengan memandang suatu sistem mulai dari *mould* hingga tempat proses *straightening* sebagai suatu sistem. Jadi dalam hal ini untuk setiap posisi irisan di dalam *caster* dapat dianggap kondisinya selalu sama sepanjang waktu di tempat tersebut.

Pada irisan tipis *strand* (Gambar (2)), fluks panas dikonduksikan dari permukaan bagian dalam baja yang sedang mengalami proses pembekuan menuju permukaan dinding luar *strand*. Fluks panas tersebut berasal dari panas yang dilepaskan oleh bagian baja yang sedang mengalami pembekuan. Fluks panas ini kemudian dilepaskan pada permukaan luar *strand* dan diserap oleh fluida pendingin yang berada di sekeliling *strand*. Selain fluks panas yang berasal dari panas laten pembekuan tersebut, masih terdapat pula fluks panas proses pendinginan ke lingkungan (panas sensibel pendinginan material). Fluks panas pembekuan dan pendinginan inilah yang harus dikeluarkan dari material ke lingkungan selama berjalan dari *mould* hingga proses pemotongan dilakukan. Akibat pengeluaran fluks panas tersebut, material akan mengalami penurunan temperatur. Namun pada studi ini penurunan temperatur yang akan diamati dan dievaluasi dibatasi hingga daerah pelurusan material (*straightening*). Berikut ini akan dibahas terlebih dahulu estimasi fluks panas solidifikasi.

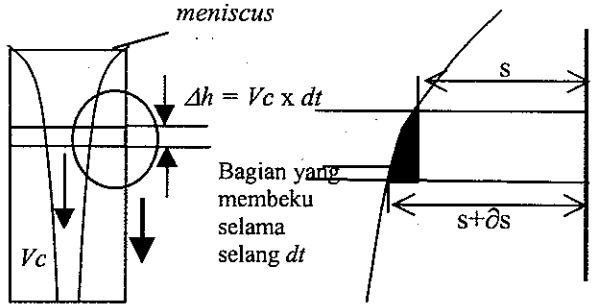


Gambar 1 Daerah penyerapan panas pada saat pengecoran kontinyu berlangsung



Gambar 2 Arah perpindahan panas pada penampang irisan *strand* pada kondisi tertentu

Tebal dinding *strand* yang telah memadat tergantung pada waktu yang telah dilalui irisan *strand* untuk bergerak dari permukaan *meniscus* hingga posisi irisan yang hendak diamati. Dengan menganalisis proses pengecoran kontinyu dalam kondisi stedi seperti yang akan dilakukan pada penelitian ini, irisan *strand* pada suatu jarak tertentu dari *meniscus* dapat dianalisis untuk menentukan distribusi temperatur permukaan irisan serta tebal dinding beku yang telah terbentuk.



Vc = Kecepatan *casting*
t = waktu proses
Δh = tebal irisan

Gambar 3 Penentuan penampang irisan yang akan dianalisis

Gambar 3 memperlihatkan penentuan irisan tipis *strand* yang hendak dianalisis. Sumbu t menyatakan waktu yang dibutuhkan irisan untuk berjalan dari permukaan miniscus hingga posisi pengamatan yang diinginkan, sedangkan Δh menyatakan tebal irisan tersebut.
Untuk suatu waktu t dihitung dari awal pembekuan, tebal dinding yang membeku s mengikuti persamaan berikut:

$$s = k\sqrt{t} \tag{1}$$

Pada persamaan (1) tersebut k adalah suatu konstanta. Dari persamaan di atas, laju pertumbuhan dinding beku *strand* dapat ditulis kembali menjadi:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{k}{2\sqrt{t}} \tag{2}$$

Sedangkan massa baja yang membeku selama selang waktu dt dinyatakan sebagai berikut:

a. Luas penampang yang membeku selama selang waktu dt adalah:

$$A_p = \int_t^{t+dt} Vc.[s(t)]dt - k.Vc.\sqrt{t}dt = k.Vc.\left[\frac{2}{3}\left\{(t+dt)^{3/2} - t^{3/2}\right\} - \sqrt{t}dt\right] \tag{3}$$

b. Volume material yang membeku selama selang waktu dt adalah:

$$V_p = A_p \times Keliling \tag{4}$$

dimana *Keliling* adalah keliling slab yang sedang mengalami pembekuan dalam selang waktu dt, yang besarnya adalah:

$$Keliling = 2\left[(L_p - 2s(t)) + L_t\right] \tag{5}$$

dengan L_p dan L_t masing-masing lebar *loose side* dan *narrow side*.

c. Massa material yang membeku selama selang waktu *dt* adalah:

$$dM = \rho_s x V_p \quad (6)$$

Fluks panas yang keluar karena proses pembekuan selama selang waktu dt dinyatakan sebagai berikut:

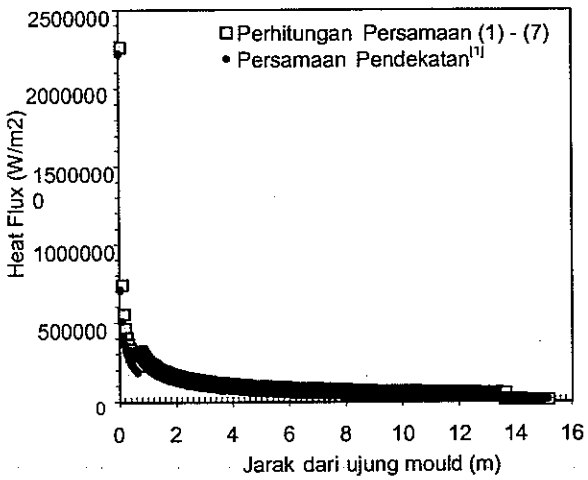
$$dQ_{sol} = dMx\Delta H_s \quad (7)$$

dengan ΔH_s adalah kalor laten pembekuan slab. Jumlah panas yang keluar akibat perubahan fasa ini akan diserap oleh sistem pendingin pada permukaan luar *strand*. Apabila dilakukan perhitungan berdasarkan persamaan (1) hingga persamaan (7), akan diperoleh nilai fluks panas (*heat flux*) solidifikasi yang harus dikeluarkan dari material ke lingkungan sepanjang lintasan yang dilalui mulai dari saat material memasuki *mould* hingga daerah pelurusan (*straightening*) yaitu:

$$q_{cool} = \frac{dQ_{sol}}{dt} = \frac{dMx\Delta H_s}{dt} \quad (8)$$

Dengan memanfaatkan sifat-sifat fisik baja untuk slab ini, nilai fluks panas solidifikasi tersebut dapat dihitung dan hasilnya diperlihatkan pada Gambar (4).

Selain fluks panas solidifikasi tersebut, material juga mengalami penurunan temperatur sepanjang perjalanannya akibat proses pendinginan baik oleh air yang disemprotkan ke permukaan material, oleh roll yang didinginkan maupun radiasi ke lingkungan. Jadi turunnya temperatur slab berkaitan erat dengan jumlah fluks panas pembekuan dan pendinginan tersebut. Jumlah kedua fluks panas tersebut yang merupakan masukan pada syarat batas dalam perhitungan numerik. Fluks panas total yang harus dikeluarkan dari slab ke lingkungan berjalan dengan mekanisme gabungan antara radiasi dan konveksi. Oleh sebab itu berikut ini akan dibahas estimasi mengenai fluks panas pendinginan beserta koefisien perpindahan panas konveksi dan radiasi yang akan merupakan besaran syarat batas bagi perhitungan numerik.



Gambar 4: Fluks panas solidifikasi sepanjang lintasan *hot strand*

Berdasarkan literatur mengenai proses pengecoran kontinyu slab [1], nilai koefisien perpindahan panas proses pendinginan akibat penyemprotan air (tidak termasuk radiasi) terkait erat dengan laju massa atau laju volume air yang disemprotkan. Bila fluks air yang disemprotkan untuk suatu zone tertentu adalah sebesar V_{air} dalam [liter/m^2 s], maka nilai koefisien perpindahan panas h_{eff} di zone tersebut dapat diformulasikan secara umum sebagai berikut:

$$h_{eff} = C[V_{air}]^n \quad (9)$$

dengan nilai C dan n merupakan konstanta yang diperoleh berdasarkan hasil pengamatan di lapangan. Pada umumnya nilai n berkisar di 0,75. Dalam studi ini nilai C akan ditentukan berdasarkan hasil pengamatan lapangan mengenai laju volume air yang disemprotkan di masing-masing zone. Selain hal itu, khusus untuk pendinginan slab akibat roll yang didinginkan oleh air, nilai koefisien perpindahan panasnya diasumsikan digabung dalam persamaan (9) sehingga nilai h_{eff} dan C pada persamaan tersebut merupakan hasil evaluasi berdasarkan data pengamatan laju volume air yang disemprotkan di setiap zone termasuk roll bagi zone yang memang terdapat roll yang didinginkan oleh air. Sedangkan untuk zone dimana rollnya tidak didinginkan oleh air, nilai h_{eff} dan C mewakili kondisi pada penyemprotan air tanpa pendinginan roll oleh air. Nilai C yang diperoleh dari hasil pengamatan di lapangan adalah $C = 300$.

Dengan diperolehnya nilai koefisien perpindahan panas pendinginan ini, maka nilai fluks panas pendinginan pada daerah atau zone dengan pendinginan air adalah:

$$q_{tot} = q_{conv} + q_{rad} \quad (10)$$

Untuk daerah pendinginan radiasi saja (tanpa penyemprotan air), secara umum formulasi fluks panas radiasi q_{rad} dalam [W/m^2] dapat ditulis sebagai berikut:

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma F_{1-2}[T_s^4 - T_\infty^4] \quad (11)$$

dimana ε, σ dan F_{1-2} berturut-turut adalah emisivitas permukaan slab, konstanta Boltzman (σ = 5,67 x 10^{-8} W/(m^{2}K)) dan faktor bentuk dari geometri permukaan slab terhadap permukaan sekitarnya. Sedangkan T_s dan T_∞ masing-masing adalah temperatur permukaan slab dan temperatur sekeliling slab (lingkungan).

Jadi pada daerah dengan pendinginan radiasi tanpa penyemprotan air (misalnya di daerah mendekati titik pelurusan), fluks panas total yang dikeluarkan oleh material ke lingkungan adalah sama dengan:

$$q_{tot} = q_{conv} + q_{rad} + q_{kond.roll} \quad (12)$$

dimana q_{conv} dan $q_{kond.roll}$ adalah berturut-turut fluks panas yang keluar ke lingkungan secara konveksi tanpa pendinginan air dan secara konduksi melalui kontak antara slab dengan roll yang akhirnya panas tersebut ditransfer ke air pendingin roll. Dalam perhitungan numerik, fluks panas ini, yang biasanya dinyatakan dalam bentuk koefisien perpindahan panas total ke lingkungan merupakan syarat batas yang diberikan untuk menyelesaikan persamaan yang mengatur proses sehingga akan diperoleh solusi berupa distribusi temperatur di dalam maupun di permukaan slab. Biasanya, khusus untuk syarat batas di daerah pendinginan radiasi, fluks panas radiasi akan lebih mudah dievaluasi bila dinyatakan dalam bentuk koefisien perpindahan panas efektif untuk radiasi dikalikan dengan beda temperatur antara permukaan slab dan lingkungan. Dengan pernyataan ini, persamaan (11) dapat ditulis sebagai:

$$q_{rad} = h_{eff.rad}[T_s - T_\infty] \quad (13)$$

dimana $h_{eff.rad}$ adalah koefisien perpindahan panas ekivalen radiasi yang dapat dinyatakan pula sebagai:

$$h_{eff.rad} = \varepsilon\sigma F_{1-2}[T_s^2 + T_\infty^2][T_s + T_\infty] \quad (14)$$

Nilai fluks panas radiasi ini akan dihitung oleh program komputer FLUENT 5.4 secara langsung karena didalam software tersebut tersedia fasilitas untuk menghitungnya. Sedangkan untuk fluks panas konveksi dan konduksi akan dapat dievaluasi dengan cara menambahkan koefisien perpindahan panas ekivalen untuk keduanya sebagai syarat batas tambahan pada saat eksekusi dengan software tersebut.

2.1 Fluks panas konveksi :

Konveksi dari slab ke lingkungan sekitarnya diasumsikan terjadi secara natural karena kecepatan casting yang cukup rendah. Untuk konveksi natural seperti ini, koefisien perpindahan panasnya dapat diestimasi berdasarkan formulasi berikut [2,3,4]:

$$Nu_L = 0{,}54(Ra_L)^{0,25} \quad \text{untuk } 10^4 < \mathrm{Ra_L} < 10^7 \quad (15)$$

atau

$$Nu_L = 0{,}15(Ra_L)^{1/3} \quad \text{untuk } 10^7 < \mathrm{Ra_L} < 10^{11} \quad (16)$$

dimana: Nu_L adalah bilangan Nusselt = $[h_c L/k_f]$ dan Ra_L adalah bilangan Rayleigh = $\dfrac{g\beta_1(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\upsilon}$ dengan g adalah percepatan gravitasi bumi = 9,81 m/s^2, β_1 adalah koefisien ekspansi thermal volumetrik [K^{-1}], $(T_s - T_\infty)$ adalah beda temperatur permukaan slab dengan lingkungan [K], L adalah setengah lebar slab [m], α Diffusivitas termal gas di sekitar slab [m^2/s], dan ν adalah viskositas kinematik gas di sekitar slab [m^2/s].

Dengan asumsi bahwa gas di sekitar slab yang dominan adalah udara, seluruh sifat gas dianggap diwakili oleh sifat-sifat udara pada temperatur film yaitu temperatur rata-rata antara permukaan slab dengan lingkungan. Apabila sebagai pendekatan temperatur rata-rata slab adalah 950°C dan temperatur lingkungan adalah 30°C, maka temperatur film adalah 490°C atau 763 K. Sifat-sifat udara pada temperatur 763 K ini diperoleh dari tabel-tabel sifat udara yang nilainya antara lain:

β_1 = (1/763) = 0,00131 [K^{-1}]
α = 111 x 10^{-6} [m^2/s]
ν = 78 x 10^{-6} [m^2/s]

Sedangkan untuk lebar slab rata-rata untuk baja medium pada evaluasi ini ditentukan sebesar 1,52 m yaitu lebar rata-rata antara slab 1460 mm dan 1580 mm. Dengan demikian nilai L adalah 0,76 m. Dari nilai-nilai tersebut bilangan Rayleigh dapat dievaluasi yaitu sebesar Ra_L = 6,06 x 10^8 dan bilangan Nusselt adalah Nu_L = 126,93. Dengan demikian koefisien perpindahan panas konveksi natural pada daerah radiant cooling ini adalah $h_c = Nu_L.k_f/L$ = 126,93 . 0,055 / 0,76 = 9,2 [W/m^{2}K]

2.2 Fluks panas konduksi melalui roll ke fluida pendingin roll :

Konduksi dari slab menuju roll dapat terjadi akibat kontak langsung antara keduanya. Karena jarak antara roll adalah 0,45 m, maka diasumsikan bahwa konduksi efektif yang terjadi antara roll dan slab adalah selama terjadinya kontak tersebut. Sedangkan diameter roll adalah 0,4 m. Dengan demikian konduksi efektif diasumsikan terjadi pada [0,45/(π. 0,4)] bagian dari keliling setiap rol yaitu sebesar 0,36 bagian. Berdasarkan asumsi tersebut panas yang diterima oleh air pendingin roll diasumsikan 36% berasal dari konduksi antara slab dan roll sedangkan sisanya merupakan panas yang diserap air pendingin melalui mekanisme lain yaitu radiasi dan konveksi, karena permukaan roll berada di dekat slab. Panas total yang diterima oleh air pendingin roll dapat dievaluasi berdasarkan data dari hasil pengamatan di lapangan. Data hasil pengamatan tersebut antara lain:

- Debit air pendingin rata-rata setiap roll adalah 42 l/menit = 0,7 kg/s
- Temperatur air pendingin rata-rata masuk roll adalah 30°C
- Temperatur air pendingin rata-rata keluar dari roll adalah 42°C
- Kenaikan temperatur air pendingin rata-rata adalah 12 K

Apabila kapasitas panas air pendingin roll diasumsikan konstan sebesar 4200 [J/kg.K], maka laju panas total yang diterima oleh air pendingin roll selama melewati roll adalah sebesar:

$q_{air\ pend.\ roll}$ = 0,7 x 4200 x 12 = 35280 [W]

Dari laju panas total yang diterima oleh air pendingin roll tersebut, yang berasal dari konduksi melalui kontak antara slab dan roll adalah sebesar :

$q_{kond.roll}$ = 0,36 x 35280 = 12700 [W]

Untuk mencari ekivalensi antara konduksi dengan konveksi, didefinisikan koefisien perpindahan panas konveksi ekivalen konduksi $h_{ek.\ kond.}$ sedemikian rupa sehingga seolah-olah laju panas konduksi tersebut dapat pula ditulis secara ekivalensi dengan konveksi melalui persamaan berikut:

$$q_{kond.roll} = h_{ek.\ kond.}\ A_{kontak}(T_s - T_\infty) \ [W]$$

Dengan demikian $h_{ek.\ kond.}$ dapat diestimasi yaitu sebesar:

$$h_{ek.kond.} = \frac{q_{kond.roll}}{A_{kontak}(T_s - T_\infty)} = \frac{12700}{(0{,}45x1{,}520)(950 - 30)} =$$

20,2 [W/m^{2}K].

Jadi dengan demikian nilai koefisien perpindahan panas konveksi ekivalen total antara konduksi dan konveksi natural dapat diestimasi yaitu merupakan jumlah antara koefisien perpindahan panas konveksi natural h_c = 9,3 [W/m^{2}K] dengan koefisien perpindahan panas konveksi ekivalen konduksi $h_{ek.kond.}$ = 20,2 [W/m^{2}K]. Nilai koefisien konveksi total atau gabungan antara konveksi natural dan konduksi tersebut menjadi sebesar $h_{ek.total.konveksi}$ = 29,5 [W/m^{2}K]. Nilai ini dibulatkan menjadi 30 [W/m^{2}K] yang dimasukkan sebagai nilai pada syarat batas konveksi saat eksekusi persamaan yang mengatur proses dengan *software* FLUENT 5.4 [5].

3. SIMULASI NUMERIK PROSES SOLIDIFIKASI

Distribusi temperatur slab selama proses pengecoran merupakan aspek penting untuk diketahui. Untuk mencari distribusi temperatur slab selama proses pengecoran berlangsung diperlukan formulasi matematis

yang mewakili proses solidifikasi dalam *continuous casting*. Formulasi matematis yang terlibat dalam proses solidifikasi ini adalah persamaan kekekalan massa, persamaan kekekalan momentum, dan persamaan kekekalan energi. Persamaan deferensial parsial non linier tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

Persamaan kekekalan massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w)=0 \qquad (17)$$

Persamaan kekekalan momentum arah x

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho u^2+P\right)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho uv)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho uw)= \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \qquad (18)$$

Persamaan kekekalan momentum arah y

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho v^2+P\right)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho vw)= \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \qquad (19)$$

Persamaan kekekalan momentum arah z

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho uw)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho vw)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho w^2+P\right)= \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \qquad (20)$$

Persamaan kekekalan energi

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h)+\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta H)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho uh)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho vh)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho wh)= \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \qquad (21)$$

dimana

ρ = densitas
t = waktu
u,v,w = komponen kecepatan arah x,y,z
P = tekanan statis
τ_{xx} = tegangan normal = $\frac{4}{3}\mu\frac{\partial u}{\partial x}$
τ_{xy} = tegangan geser = $\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)$
k = konduktivitas termal bahan
V = kecepatan aliran slab
T = temperatur
H = $h + \Delta H$ = entalpi
β = fraksi cair, dimana
β = $\frac{\Delta H}{L}=0$ jika $T < T_{solidus}$, $\frac{\Delta H}{L}=1$ jika $T > T_{liquidus}$, dan $\frac{\Delta H}{L}=\frac{T-T_{solidus}}{T_{liquidus}-T}$ jika $T < T_{solidus}$ yang merupakan syarat batas perubahan fasa (antara permukaan cair dan padat)

$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T} C_p\, dT$

C_p = panas jenis pada tekanan konstan
h_{ref} = entalpi referensi
T_{ref} = temperatur referensi
ΔH = kandungan panas laten pada baja yang sedang mengalami pembekuan (*latent heat content)*
L = panas laten perubahan fasa.

Solusi simultan persamaan (17) hingga persamaan (21) akan memberikan hasil yang unik bila sudah diberikan syarat batas. Salah satu syarat batasnya adalah konveksi atau radiasi di permukaan *slab* selama mengalami proses pendinginan. Besarnya koefisien perpindahan panas konveksi dan radiasi yang berguna bagi proses solidifikasi dan proses pendinginan dapat dihitung melalui persamaan (9) hingga (16). Mengingat panas konveksi dan radiasi ini sebagian dipergunakan untuk menguapkan air pendingin yang disemprotkan ke permukaan *slab*, maka perhitungan koefisien perpindahan panas akan dapat dilakukan bila data air pendingin diketahui.

Persamaan (17) sampai (21) diselesaikan dengan metoda pendekatan volume hingga (*finite volume*). Agar supaya persamaan diferensial parsial (17) hingga (21) dapat diselesaikan, persamaan tersebut harus diintegralkan melingkupi suatu volume kontrol tertentu. Volume kontrol dibentuk dengan membagi domain solusi menjadi volume-volume kecil berhingga sesuai dengan kebutuhan. Solusi total diperoleh dengan cara menyusun solusi individual pada setiap volume kontrol dengan mempertahankan kontinuitas pada setiap batas antar volume kontrol. Metoda volume hingga ini yang digunakan perangkat lunak Fluent 5.4 dalam menyelesaikan persamaan diferensial parsial (17) hingga (21). Untuk dapat mensimulasikan *continuous casting* dengan menggunakan perangkat lunak Fluent dibutuhkan data-data sebagai berikut:

a. Data sifat-sifat material baja yang meliputi:
   - Massa jenis
   - Specific heat
   - Konduktivitas termal
   - Panas pembekuan
   - Temperatur Liquidus
   - Temperatur Solidus
b. *Casting speed*
c. Temperatur *Tundish*

Disamping data-data di atas, agar solusi numerik memberikan hasil yang sesuai dengan pengamatan lapangan dibutuhkan pula data-data kondisi batas di setiap permukaan *casting*. Kondisi batas tersebut adalah :

a. Kondisi batas *heat flux* untuk daerah *mould* dengan nilai *heat flux* yang diperoleh dari data pengamatan lapangan.
b. Kondisi batas campuran antara konveksi dan radiasi di daerah *secondary cooling*. Nilai perpindahan panas konveksi untuk daerah ini menggunakan persamaan (9) dengan konstanta C = 300. Data debit aliran air pendingin (V_{air}) diperoleh dari pengamatan lapangan.
c. Kondisi batas radiasi di daerah pendinginan radiasi dengan tambahan kondisi batas konveksi akibat sisa-sisa pendinginan daerah *secondary cooling*. Besarnya koefisien konveksi di daerah radiant cooling berdasarkan pengamatan numerik adalah 30 W/m^{2}K untuk daerah *wide side* dan 135 W/m^{2}K untuk daerah *narrow side*.

Untuk mengeksekusi perangkat lunak Fluent 5.4 pada kasus *continuous casting* baja *low-carbon* dan baja *medium-carbon*, sifat-sifat material yang digunakan adalah [2]:

- Densitas (fungsi temperatur). Dengan asumsi bahwa densitas baja hampir tidak berbeda untuk berbagai macam *grade*, densitas yang digunakan pada simulasi ini adalah:

Tabel 1 Densitas baja sebagai fungsi temperatur

Temperatur (K)	Densitas (Kg/m^3)
273	7850
1273	7540
1825	7200

- *Specific heat* bergantung pada *grade* baja, nilainya akan ditabelkan untuk setiap kasus.
- Konduktivitas termal bergantung pada *grade* baja, ditunjukkan pada tabel tersendiri.
- Panas laten pembekuan = 265977 J/kg
- Temperatur liquidus dan temperatur solidus bergantung pada grade baja dimana nilainya dievaluasi berdasar persamaan empiris [2] yaitu:

$$T_{liq} = 1536 - \{78[\%C] + 7.6[\%Si] + 4.9[\%Mn] + 34.4[\%P] + 38[\%S] + 4.7[\%Cu] + 3.1[\%Ni] + 1.3[\%Cr] + 3.6[\%Al]\} \quad (22)$$

$$T_{sol} = 1536 - \{415.5[\%C] + 12.3[\%Si] + 6.8[\%Mn] + 124.5[\%P] + 183.9[\%S] + 4.3[\%Ni] + 1.4[\%Cr] + 4.1[\%Al]\} \quad (23)$$

- *Casting speed*, temperatur *tundish*, dan *mould cooling* dan *secondary cooling* diperoleh dari hasil pengamatan di lapangan.

Dengan data-data tersebut serta beberapa data tambahan yang bersifat operasional pengecoran yang diperoleh dari lapangan, evaluasi dilakukan. Kemudian dilakukan perbandingan temperatur antara yang diperoleh dari simulasi dengan hasil pengukuran di lapangan di posisi-posisi tertentu. Kasus yang diteliti ada lima macam, dua diantaranya akan dipresentasikan di sini antara lain:

- Baja karbon rendah, format 1260 x 200mm, grade IA-0503
- Baja karbon medium, format 1580 x 200 mm, grade OA-1810

3.1 Baja karbon rendah, Format 1260x200, grade: IA-0503

Beberapa sifat baja karbon rendah merupakan fungsi grade dan yang menjadi data masukan bagi perhitungan numerik diberikan dalam tabel-tabel berikut:

Tabel 2 Panas spesifik baja (*specific heat*) Cp

Temperatur (K)	Cp (J/Kg K)
555	824
1000	1648
1144	603
1762	658
1762	7900 *) – fasa cair
1798	7900 *) – fasa cair
1798	664
2000	664

Tabel 3 Konduktivitas termal baja k (W/mK)

Temperatur (K)	k (W/mK)
0	76
1144	27
1798	35
1798	260 *) – fasa cair
2000	260 *) – fasa cair

Disamping data sifat baja di atas, data *mould cooling* dan *secondary cooling* juga dibutuhkan untuk penerapan syarat batas. Data tersebut diperoleh dari pengukuran di lapangan, dan diberikan pada Tabel (4).

Tabel 4 Parameter operasi proses pendinginan baja

Parameter	Rata-rata	*Range*
Grade	IA-0503	
Format, mm	1260	
Casting Speed m/min	0,9	
Temp. *tundish*, ^{0}C	1549	1545 - 1552
Mould Cooling		
Temperatur air pendingin		
Wide side, ^{0}C	4,72	
Narrow side, ^{0}C	6,8	
Secondary cooling		
Spray ring, l/min	158	158 – 159
Zone 1A, l/min	651	643 – 670
Zone 1B, l/min	251	246 – 262
Narrow side, l/min	170	170
Zone 2, l/min	429	423 – 435
Zone 3 FS, l/min	166	161 –184
Zone 3 LS, l/min	150	138 – 162
Zone 4 FS, l/min	93	89 – 105
Zone 4 LS, l/min	93	89 – 105
Straightener		
Center, Temp. ^{0}C	973	948 – 995
Corner, Temp. ^{0}C	821	795 – 836

Catatan:

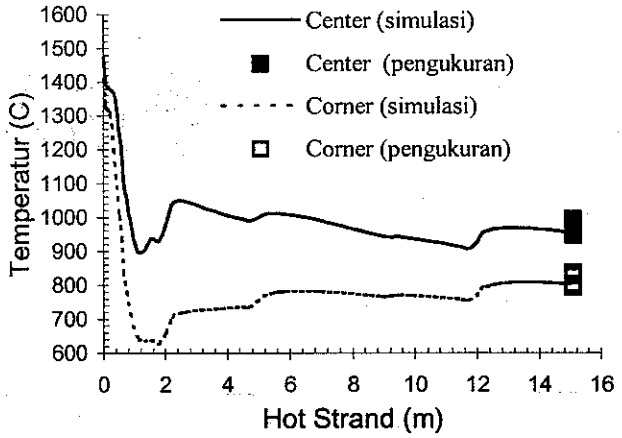
mould water inlet : 4840 l/min
Mould water outlet : 4400 l/min - *wide side*
: 440 l/min - *narrow side*

Berdasarkan data pengukuran *secondary cooling*, perbandingan debit aliran air pendingin yang mengenai slab dan laju produksi baja adalah 0,95 l/kg.

Hasil simulasi numerik dengan menggunakan sifat-sifat baja yang sudah diuraikan di atas dan data kondisi batas dari mould cooling dan secondary cooling ditampilkan dalam bentuk grafik temperatur di permukaan *center loose side* dan *corner loose side* serta kontur fraksi cair di *center line* di bawah ini.

Gambar (5) menunjukkan bahwa simulasi numerik temperatur permukaan loose side memberikan hasil yang akurat dibandingkan dengan hasil pengukuran di lapangan. Dengan demikian penggunaan nilai sifat-sifat baja dan parameter-parameter lain dalam simulasi

numerik yang sudah diuraikan di atas sejauh ini masih sesuai dengan kondisi lapangan.



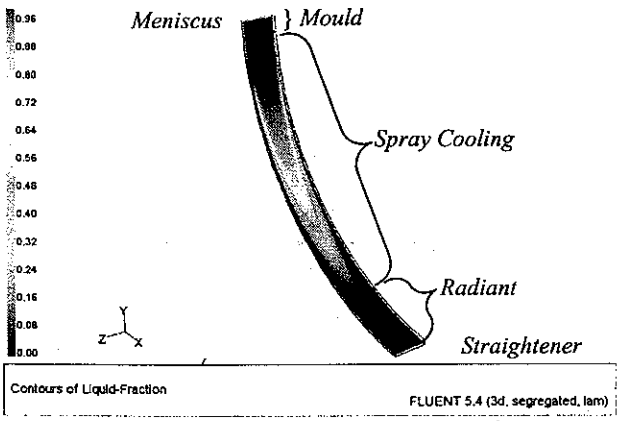
Gambar 5 Profil temperatur permukaan *loose side*

Untuk mengetahui lebih detail temperatur di beberapa tempat di permukaan *center loose side,* berikut ini ditabelkan nilai-nilainya.

Tabel 5 Temperatur di beberapa titik di permukaan *center loose side* (°C)

Posisi	*Center*	*Corner*
Meniscus	1549	
Tengah *mould*	1367	1193
Ujung *mould*	1107	833
Zone 1A	901	647
Zone 1B	932	632
Zone 2	1022	729
Zone 3L	988	781
Zone 4L	926	766
Straigtening	965 (972)	815 (821)

Keterangan : () temperatur rata-rata hasil pengukuran



Gambar 6 Kontur fraksi cair di *center line.*

Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa temperatur di permukaan center loose side berbeda –7 °C (0.72%) dibanding data rata-rata pengukuran, tetapi masing berada di dalam daerah pengukuran yaitu 948 °C sampai 995 °C. Sementara perbedaan temperatur corner loose side adalah –6 °C (-0.73%) tetapi masih berada pada daerah pengukuran yaitu 795 °C hingga 836 °C. Dengan demikian hasil simulasi numerik cukup akurat.

Selanjutnya kontur fraksi cair di center line yang menggambarkan di mana posisi baja mulai membeku semua dapat dilihat pada Gambar (6). Gambar (6) memberikan informasi bahwa dengan perbandingan semprotan air dan laju baja senilai 0,95 l/kg dan $\Delta T_{liq\text{-}sol}$ = 31 K menyebabkan fraksi cair di center line habis pada jarak 12,42 m dari meniscus. Pada kondisi ini maka nilai k persamaan (1) adalah sebesar 26,92.

Dengan cara yang sama, validasi simulasi numerik dilakukan untuk format dan grade yang lain.

3.2 Baja Karbon Medium, Format: 1580 x 200, Grade: OA-1810

Data yang diperlukan untuk menyimulasi kasus ini antara lain diberikan berturut-turut pada Tabel (6) hingga Tabel (8):

Tabel 6 Nilai rata-rata dari 3 data pengukuran *mould cooling* dan *secondary cooling.*

	Rata-rata	*Range*	Rata-rata	*Range*
Grade	OA-1810			
Format, mm	1580			
Casting Speed m/min	0,8		0,9	
Temp. *tundish*, °C	1534	1532 – 1536	1534	1532 - 1538
Mould cooling				
	Kenaikan temperatur air			
Loosed side, °C	7,6	7,2 – 7,9	8,5	
Fixed side, °C	9,4	9,2 – 10	10,7	
Narrow side, °C	6.3	6 – 6,5	7,1	
Secondary cooling				
Spray ring, l/min	134	130 – 136	136	129 – 143
Zone 1A, l/min	528	498 – 543	545	490 – 644
Zone 1B, l/min	262	258 – 267	283	256 – 339
Narrow side, l/min	130	130	138	130 – 152
Zone 2, l/min	406	404 – 408	402	401 – 404
Zone 3 FS, l/min	125	113 – 126	120	112 – 126
Zone 3 LS, l/min	145	144 – 146	156	146 – 175
Zone 4 FS, l/min	49	49	52	49 – 56
Zone 4 LS, l/min	50	49 – 52	47	45 – 49
7 m dari *meniscus*				
Center, Temp. °C	997	994 - 1000	1012	998 – 1026

Catatan:

mould water inlet : 4840 l/min
mould water outlet : 4400 l/min - *wide side*
: 440 l/min - *narrow side*

Perbandingan laju debit aliran air pendingin yang mengenai slab dan laju produksi baja berda-sarkan data pengukuran ini adalah 0,86 l/kg untuk kecepatan pengecoran 0,8 m/min dan 0,79 l/kg untuk kecepatan pengecoran 0,9 m/min

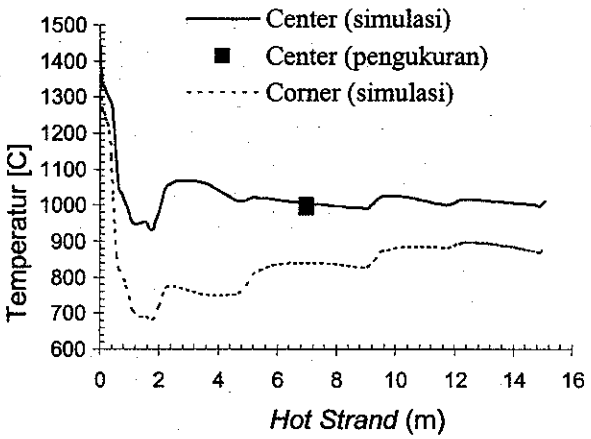
Tabel 7 Panas spesifik baja karbon medium (Cp)

Temperatur (K)	Cp (J/Kg K)
555	824
1000	1648
1144	603
1711	658
1711	7000
1785	7000
1785	664
2000	664

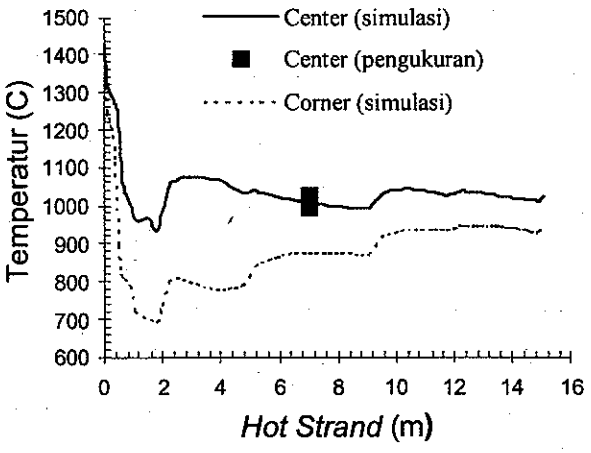
Tabel 8 Konduktivitas termal baja karbon medium

Temperatur (K)	k (W/mK)
0	76
1144	27
1785	35
1785	260
2000	260

Hasil simulasi numerik pada kasus ini dalam bentuk grafik temperatur diperlihatkan berturut-turut pada Gambar (7) dan Gambar (8).



Gambar 7 Profil temperatur permukaan *loose side*, *Vc* = 0,8 m/min



Gambar 8 Profil temperatur permukaan *loose side*, *Vc* = 0,9 m/min

Dari hasil evaluasi numerik dapat dilihat bahwa temperatur hasil simulasi pada kasus ini berbeda 12 ^{0}C (1,2%) di atas rata-rata data pengukuran atau 5 ^{0}C di atas *range* tertinggi pengukuran (1000 ^{0}C) untuk kecepatan casting 0,8 m/menit. Sementara untuk kecepatan casting 0,9 m/min perbedaan antara temperatur hasil perhitungan numerik dengan hasil pengukuran adalah sebesar 5 ^{0}C (0,49%), tetapi berada di dalam range pengukuran di lapangan (998 ^{0}C – 1026 ^{0}C). Dengan perbedaan temperatur minimal sebesar 5^{0}C ini, hasil simulasi numerik masih cukup akurat terhadap hasil pengukuran di lapangan.

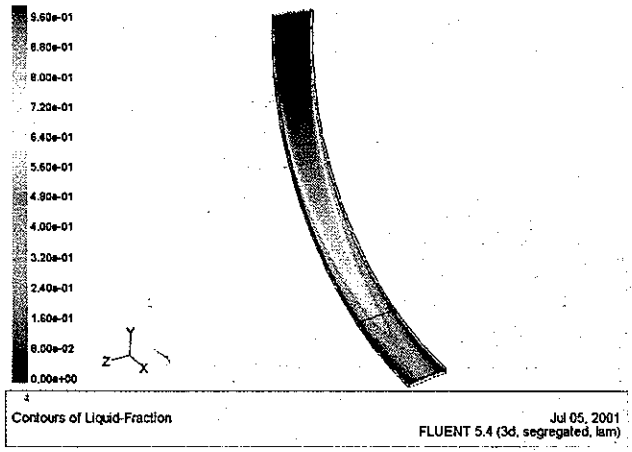
Nilai temperatur pada titik-titik tertentu di permukaan *center loose side* diberikan pada Tabel (9).

Tabel 9 Temperatur beberapa titik di permukaan *center loose side.*

Posisi	V_{cas}= 0,8 m/min		V_{cas}=0.9 m/min	
	Center	*Corner*	*Center*	*Corner*
Meniscus	1534		1534	
Tengah *mould*	1295	1204	1276	1181
Ujung *mould*	1049	824	1040	807
Zone 1A	952	710	961	723
Zone 1B	940	683	946	694
Zone 2	1065	756	1073	785
Zone 3L	1005	841	1007	876
Zone 4L	1018	885	1040	935
Straightening	1012	884	1022	945
Meter ke 7	1005(997)	840	1007(1012)	876

Keterangan : ( ) temperatur rata-rata hasil pengukuran

Kontur fraksi cair untuk kasus ini ditampilkan pada Gambar (9). Dari Gambar (9) tersebut, apabila dibandingkan dengan hasil kontur fraksi cair untuk baja karbon rendah (Gambar(6)), nampak bahwa posisi berakhirnya fasa cair bergeser lebih dekat menuju daerah *straightening*.



Gambar 9 Kontur fraksi cair di *center line*, *Vc* = 0,8 m/min.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan beberapa hal yang dapat diambil sebagai kesimpulan dari hasil evaluasi numerik serta perbandingan antara hasil numerik dengan pengukuran di lapangan adalah sebagai berikut:

1. Simulasi numerik dengan menggunakan sifat-sifat baja yang sudah diuraikan dalam bab ini memberikan hasil yang akurat terhadap data pengukuran lapangan untuk semua kasus dengan selisih temperatur maksimal 27 ^{0}C (2,92%) terhadap data rata-rata pengukuran di lapangan tetapi masih berada di dalam daerah pengukuran.
2. Semakin besar perbedaan antara temperatur liquidus dan solidus baja $\Delta T_{liq\text{-}sol}$ yang ditandai dengan semakin tinggi kandungan karbon pada baja akan menyebabkan fraksi cair semakin bergeser ke arah titik *straightening*.
3. Semakin besar perbandingan debit aliran air pendingin terhadap produksi baja menyebabkan fraksi cair bergeser ke arah *meniscus*.

Dari dua kesimpulan terakhir ini, beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam operasi pengecoran kontinyu (*continuous casting*) yaitu:

1. Untuk dapat menjaga agar posisi fraksi cair habis sebelum *straightening*, bagi baja dengan kandungan karbon semakin tinggi, dibutuhkan perbandingan debit aliran air pendingin terhadap produksi baja yang semakin tinggi
2. Agar diperoleh baja hasil cor yang tidak mengalami penggelembungan karena masih adanya fraksi cair di center line, diperlukan perbandingan debit aliran air pendingin terhadap produksi baja yang tinggi. Tetapi di sisi lain perbandingan debit aliran air pendingin terhadap produksi baja yang tinggi akan menyebabkan temperatur permukaan slab terlalu rendah, sehingga dapat mengakibatkan terjadinya *corner crack*. Hal ini terutama akan terjadi pada baja karbon tinggi. Untuk mengatasi masalah ini diperlukan cara lain. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah misalnya mengubah geometri slab. Namun sebelum cara ini diterapkan di lapangan akan diteliti terlebih dahulu sebagai kelanjutan dari penelitian ini.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. Hans F. Schrewe, '*Continuous Casting of Steel, Fundamental Principles and Practice*', Verlag Stahleisen mbH, Dusseldorf, Germany, 1989
2. The British Iron and Steel Research Association, '*Physical Constants of Some Commercial Steels at Elevated Temperatures*', Butterworths Scientific Publications, London, 1953
3. E. Takeuchi, J.K. Brimacombe, '*Effect of Oscilation-Mark Formation on the Surface Quality of Continuously Cast Steel Slabs*', Metallurgical Transactions B, Volume 16B, September 1985
4. Eugene A. Mizikar, '*Mathematical Heat Transfer Model for Solidification of Continuously Cast Steel Slabs*', Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Volume 239, November 1967
5. -, '*Manual Fluent 5.4*', Fluent Inc, 1998